

Antenas ópticas y detectores de luz

Javier Alda*, José Manuel López-Alonso*,
José María Rico-García*,
Glenn Boreman**

* Departamento de Óptica
Escuela Universitaria de Óptica. Universidad Complutense de Madrid
** CREOL/ College of Optics and Photonics.
University of Central Florida. Orlando (EE.UU) boreman@creol.ucf.edu

La investigación sobre el comportamiento de estructuras metálicas cuyo tamaño es comparable a la longitud de onda de la radiación detectada puede realizarse considerándolas como antenas detectoras de radiación óptica. El diseño, análisis y caracterización de estos dispositivos requiere el estudio de los fenómenos básicos de interacción entre la radiación y la materia. A la vez, su inclusión en sistemas con relevancia tecnológica requiere la medida y caracterización de sus propiedades. Nuestro equipo de investigación, integrado en el «Grupo Complutense de Óptica Aplicada», se ha dedicado durante los últimos años al estudio de estos dispositivos así como a la caracterización de todo tipo de detectores de luz, y a la definición de aquellas figuras de mérito que son relevantes a la hora de establecer su uso.

Introducción

Las antenas ópticas son componentes ópticos que tiene el potencial de revolucionar ciertas aplicaciones tecnológicas de indudable interés, tales como las comunicaciones ópticas, el procesamiento de imágenes, y los sensores ópticos. Las antenas ópticas

The investigation about metallic structures behaviour, wich size is compaable to ware length of detected radiaton, can be done considering them as detector antena of optical radiation. Design, analysis and characterization of these dispositives require the study of basic phenomena in interaction between radiation and mathery. El sewhere, its inclusion in technology, relevance systems requires mesure and characterization of its properties our investigation group, integrated in "Applied Optics Complutense group", has been dedicated last years to the study of this dispositive and to the characterization of every kind of light detectors, and the definition of these figures of merit that are relevant at the moment of define their use

acoplan la radiación electromagnética en el visible y en el infrarrojo de una manera similar a como lo hacen las antenas radioeléctricas que nos sirven para recibir señales de radiotelevisión o telefonía. Las corrientes eléctricas inducidas por la radiación en la antena son detectadas y rectificadas para proporcionar una señal proporcional a la energía transportada por la

radiación luminosa¹. La geometría y la disposición de estas estructuras metálicas son similares a las empleadas en el diseño de antenas radioeléctricas o de microondas (fig. 1). En ese sentido, puede afirmarse que el concepto de antena óptica es intrínsecamente innovador ya que parte de diseños probados en el espectro radioeléctrico y de microondas, y los extiende y adapta al rango óptico. El tamaño de las antenas ópticas es del orden de la longitud de onda detectada. Por ello se consideran micro- y nanodispositivos. De hecho, en algunos ámbitos se les nombra como nanoantenas. Su fabricación requiere técnicas de alta resolución espacial, por ejemplo, litografía por haces de electrones o por procesado por haces de iones focalizados. Las antenas ópticas están surgiendo como alternativas reales para procesos de detección en diversos ámbitos: formación de imagen en el infrarrojo, sondas en nanociencia, detectores para sensores en el infrarrojo y visible, etcétera.

En el panorama científico más reciente se están desarrollando dispositivos que utilizan estructuras con forma de antenas para la excitación de fenómenos de rango micro y nanométrico, pero se tratan de elementos aislados, no conectados a ningún sistema externo de extracción de la señal inducida en la antena. Por otro lado existen otro tipo de sistemas detectores de luz que emplea sustancias que cambian su resistencia eléctrica con la temperatura para producir

una respuesta eléctrica procesable por un circuito externo, pero que no incorporan antenas o estructuras metálicas para la mejora de su rendimiento. En la actualidad, la conjunción de detectores y de estructuras con forma de antena está siendo desarrollada para su uso en dispositivos formadores de imagen en el infrarrojo por el grupo del Prof. Boreman de la University of Central Florida (UCF)²⁻⁵. La contribución del Profesor Boreman a nuestro equipo de trabajo asegura la disponibilidad de los dispositivos y la presencia de nuestras contribuciones en el rango visible⁶ e infrarrojo cercano en un grupo internacional de gran visibilidad. Para facilitar la cooperación internacional la Universidad Complutense de Madrid y la University of Central Florida (Orlando, Florida, EE.UU), han establecido un convenio de cooperación e intercambio de investigadores. Estos intercambios están dando lugar a importantes avances en la mejora de los dispositivos basados en antenas ópticas.

Propiedades y características de las antenas ópticas

Las aplicaciones de las antenas ópticas se han de basar en características ventajosas con respecto a los métodos de detección ya establecidos. En la tabla I mostramos una visión comparativa de estas características.

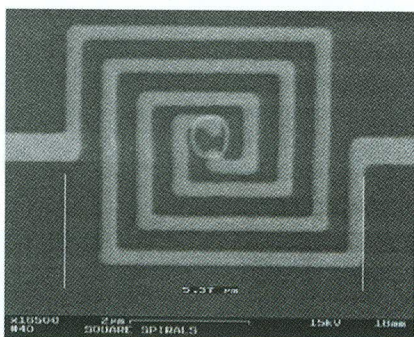


Fig. 1. Antenas ópticas para el infrarrojo con geometrías espirales.

Tabla I. Comparación de ciertas características para varios detectores en el visible y en el infrarrojo

	Visible		IR medio		Vis+ IR medio	
	Píxeles CMOS	Píxeles CCD	HgCdTe	piroeléctricos	Bolométricos	Antenas Ópticas
Dimensiones	$10^2 \lambda^2$	$10^2 \lambda^2$	$10^1\text{-}10^2 \lambda^2$	$10^1\text{-}10^2 \lambda^2$	$10^1\text{-}10^2 \lambda^2$	$10^2\text{-}10^0 \lambda^2$
Sensibilidad a la polarización	No	No	No	No	No	Sí
Direccionalidad	No	No	No	No	No	Sí
Sintonizabilidad	Por filtros	Por filtros	Por filtros	No	No	Sí (ancha)
Responsividad	10^3 V/W	10^{3-4} V/W	$10^5\text{-}10^6$ V/W	$10^3\text{-}10^4$ V/W	$10^3\text{-}10^4$ V/W	0.1 V/W
Refrigeración	Mejoran	Mejoran	Imprescindible	No	No	No
Tiempo de respuesta	10^{-7} s	10^{-7} s	10 μ s	400 μ s	400 μ s	1 ps

A partir de los valores reflejados en la tabla I podemos apreciar lo siguiente: las características de detector puntual, direccional, sensible al estado de polarización de la luz, y sintonizabilidad, son inherentes al diseño como antena óptica. En función de todo ello puede concluirse que las antenas ópticas son alternativas ventajosas para la detección de luz, de acuerdo con la siguiente lista de propiedades.

- Las antenas ópticas son detectores puntuales con áreas de detección de alrededor de λ^2 (por ejemplo para el visible, $\lambda=600$ nm, su área de detección es aproximadamente 15.000 veces más pequeña que la sección de un cabello humano). Estos valores convierten a las antenas ópticas en los detectores físicos más pequeños, y por lo tanto permiten mayor resolución espacial que las tecnologías convencionales de detección^{6,7}.

- Las antenas ópticas acoplan la radiación para rectificarla en estructuras materiales con volúmenes muy pequeños, del orden de $0,2 \mu\text{m}^3$ (mil millones de veces más pequeño que un grano de arroz) Este minúsculo volumen de material permite un tiempo de respuesta muy rápido⁴. Dispositivos no optimizados han proporcionado valores del orden de 100 ns. Sin embargo, el límite teórico del mecanismo de detección cuando se utilizan dispositivos basados en efecto túnel es del orden de 10^{-14} s.

- Las antenas ópticas son, intrínsecamente, detectores sensibles a la polarización de la radiación electromagnética detectada.

- Las antenas ópticas son detectores sintonizables en longitud de onda, aunque ciertamente el ancho espectral es bastante grande.

- Las antenas ópticas son dispositivos direccionales, es decir ciertas orientaciones de la luz incidente es mejor detectada que otras...

- Las antenas ópticas son dispositivos que funcionan a temperatura ambiente sin necesidad de elementos de refrigeración. Esta característica es especialmente atractiva en el caso de detección infrarroja, en comparación con las tecnologías actuales que precisan sistemas criogénicos funcionando a temperatura de nitrógeno líquido (-196°C) o incluso de helio líquido (-269°C).

- Las antenas ópticas permiten su integración con sistemas electrónicos de lectura y acondicionamiento de la señal. Además pueden integrarse con otro tipo de

elementos ópticos para mejorar sus características o proporcionar capacidades de detección más sofisticadas.

Entre los logros más recientes podemos señalar el obtenido al acoplar elementos difractivos (fig. 2) a antenas ópticas en el infrarrojo⁸. El diseño, fabricación y medida de los nuevos dispositivos ha permitido detectar señales 160 veces más débiles.

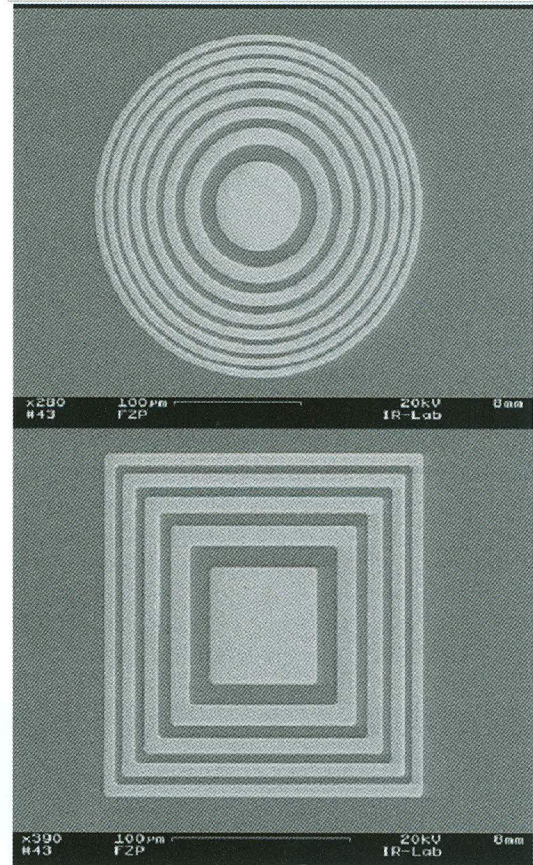


Fig. 2. Lentes de Fresnel utilizadas para mejorar la respuesta de antenas ópticas en el infrarrojo.

Otro aspecto en el que hemos desarrollado nuestro trabajo ha sido en la puesta a punto de programas y algoritmos para la simulación de la interacción de la radiación electromagnética y la materia. Los resultados obtenidos son prometedores. Este análisis numérico permite simular sistemas físicos y analizar los resultados experimentales con la garantía y fiabilidad de estas herramientas del electromagnetismo computacional^{9,10}. Por tanto podemos decir que en esta línea de trabajo se aúnan esfuerzos en la comprensión de fenómenos básicos junto con resultados experimentales de aplicación inmediata.

Caracterización de detectores de luz

Puesto que las antenas ópticas constituyen un nuevo tipo de detectores de luz hemos podido incorporar a esta línea de investigación aquellos modelos desarrollados en los pasados años para caracterizar la calidad de todo tipo de detectores. Nuestras contribuciones han estado ligadas al análisis del ruido de los sistemas detectores de imagen. Sin embargo, el marco teórico en el que hemos desarrollado nuestros modelos es lo suficientemente general como para poderlo aplicar a otros ámbitos científicos. En particular, hemos sido capaces de extraer información fuertemente contaminada por el ruido y variabilidad de los datos obtenidos^{11,12}. Los ámbitos de aplicación de nuestros modelos han sido: análisis de cámaras web, definición de pseudocolor en sistemas de visión infrarroja, análisis del ruido numérico en algoritmos de electromagnetismo computacional, y como aplicación exótica en el análisis de las series temporales de valores bursátiles.

A la vez, los resultados obtenidos en la caracterización general del ruido han sido incorporados a los procedimientos de medida que se están llevando a cabo para el análisis de antenas ópticas. Este aspecto ha sido decisivo para la optimización del diseño de nuestra estación de caracterización de antenas ópticas (fig. 3). En este sentido, el sistema de medida incorpora elementos de control de la polarización de la luz, de su frecuencia temporal, amplificadores dedicados a la extracción de señales débiles en ambientes ruidosos, y un sistema de

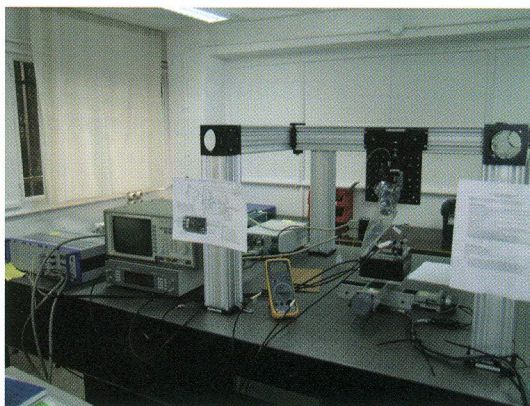


Fig. 3. Fotografía de la estación de caracterización de antenas ópticas en el visible ubicadas en los Laboratorios de la Escuela de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid.

posicionamiento con resolución de 5 nm. Todo el proceso de medida está controlado mediante ordenador a través de algoritmos desarrollados por nosotros.

Conclusiones

El trabajo realizado por nuestro equipo se asienta por igual sobre aspectos básicos y aplicados, constituyendo una línea de investigación de indudable atractivo. La ubicación de nuestro laboratorio en las instalaciones de la Escuela de Óptica de Madrid ha mejorado notablemente la eficacia del equipo de trabajo que previamente estaba repartido entre dos centros muy distantes geográficamente. En estos momentos estamos culminando un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología dirigido a la validación de las antenas ópticas para su uso en comunicaciones ópticas. Desde el 1 de enero estamos desarrollando un proyecto financiado por la Comunidad de Madrid para la mejora de la calidad de las medidas obtenidas por nuestra estación de caracterización. El siguiente paso en el que estamos comprometidos consiste en la fabricación y prueba de diseños desarrollados por nuestro equipo de trabajo para la detección directa del estado de polarización de la radiación incidente. Un dispositivo de estas características abriría la posibilidad de introducir las antenas ópticas en diversos ámbitos donde la medida del estado de polarización es decisiva¹⁶.

Bibliografía

1. Rutledge DB, Muha MS. Imaging antenna arrays. IEEE Transaction on Antennas and Propagation. 1982;AP-30:535-540.
2. <http://ir.creol.ucf.edu> (última visita 9/2/2005).
3. Gonzalez FJ, Gritz MA, Fumeaux C, Boreman GD. Two dimensional array of antenna-coupled microbolometers, Inter J Infrared Millimeter Waves 2002;23:785-797.
4. Codreanu I, Boreman GD. Integration of microbolometers with infrared microstrip antennas. Infrared Physics & Technology 2002;43:335-344.
5. González FJ, Alda J, Ilic B, Boreman G. Antenna-coupled infrared detectors for imaging applications. IEEE J of selected topics in quantum electronics, en prensa, (2005).
6. Fumeaux C, Alda J, Boreman GD. Lithographic antennas at visible frequencies. Optics Letters 1999;24:1629-1631.

7. Alda J, Fumeaux C, Codreanu I, Schaefer JA, Boreman GD. A deconvolution method for two-dimensional spatial-response mapping of lithographic infrared antennas. *Applied Optics* 1999;38:3993-4000.
 8. González FJ, Alda J, Ilic B, Boreman G. Infrared antennas coupled to lithographic zone plates. *Applied Optics* 2004;43:6067-6073.
 9. López-Alonso JM, Rico-García JM, Alda J. Photonic crystal characterization by FDTD and principal component analysis. *Optics Express* 2004;12:2176-2186.
 10. Rico-García JM, López-Alonso JM, Alda J. Estimation of the influence of finite dielectric substrates on the far-field pattern of a fan array of metallic scatterers in the infrared. *Infrared Physics and Technology* (en prensa, 2005).
 11. López-Alonso JM, Alda J, Bernabéu E. Principal components characterization of noise for infrared images. *Applied Optics* 2002;41:320-331.
 12. López-Alonso JM, Alda J. Operational parametrization of the $1/f$ noise of a sequence of frames by means of the principal components analysis in focal plane arrays. *Optical Engineering* 2003;42:1915-1922.
 13. López-Alonso JM, Monacelli B, Alda J, Boreman G. Uncertainty analysis of the spatial responsivity of infrared antennas. *Applied Optics* (en prensa, 2005).
 14. Alda J, López-Alonso JM, Rico-García JM, Zoido J, Boreman G. Spatial characterization of light detectors with nanometric resolution. *Defense and Security, Orlando, 12-16 April, 2004 Proceedings SPIE*, 5407-31.
 15. López-Alonso JM, Monacelli B, Boreman G, Alda J. Infrared laser beam temporal fluctuations: characterization and filtering. *Optical Engineering* (en prensa, 2004).
 15. Alda J, Rico-García JM, López-Alonso JM, Boreman G. Optical antennas for nano-photonics applications. *J Nanotechnology* (en prensa, 2005).
-